Dense Plasma Focus

Karsten Tell

TU München

21. Juni 2011

Gliederung

Grundlagen:

- **Rückblick: z-Pinch**
- **Instabilitäten**
- **DPF-Grundprinzip**
- **Drehimpuls und externes Magnetfeld**
- **Quanten-Magnetfeld-Effekt**

bisherige Versuche

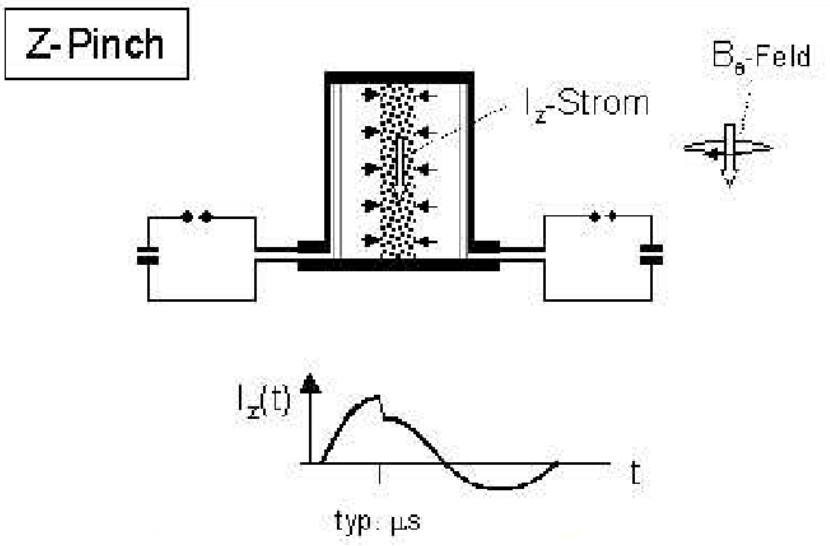
Anwendung:

- **Röntgen-/Neutronenquelle**
- **p-B Fusion ?**

Zusammenfassung

Einleitung

Instabilitäten beim Z-Pinch

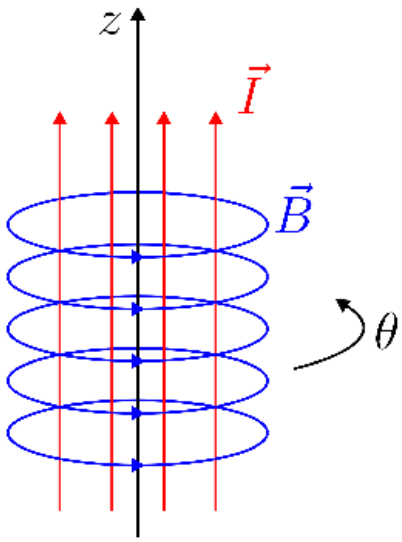


MHD-Gleichgewicht:

$$\vec{\nabla} p = \vec{j} \times \vec{B}$$

Bennet-Beziehung:

$$N k_B T = \frac{\mu_0}{8\pi} I_0$$



Z-Pinch

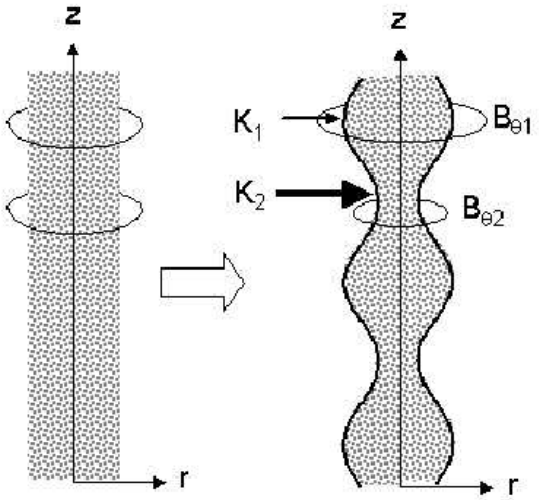
→ sehr heiße und dichte Plasmen erreichbar

→ jedoch unbrauchbar für Fusion wegen Instabilitäten!

Instabilitäten beim Z-Pinch

lineare Stabilitätsanalyse des MHD-Gleichgewichts zeigt:

M=1 Mode (Kink-Instabilität)



M=0 Mode (Würstchen-Instabilität)

→ Einschlusszeit reicht nicht aus für Zündbedingung

Instabilitäten beim Z-Pinch

Lösung:

Entweder zusätzliches Magnetfeld in z-Richtung, Biegung zu Torus

→ Tokamak-Prinzip

Oder:

Gezielte Ausnutzung der Instabilöität um hohe Dichte zu erreichen

→ DPF

Grundlagen des DPF

DPF-Prinzip

Aufbau

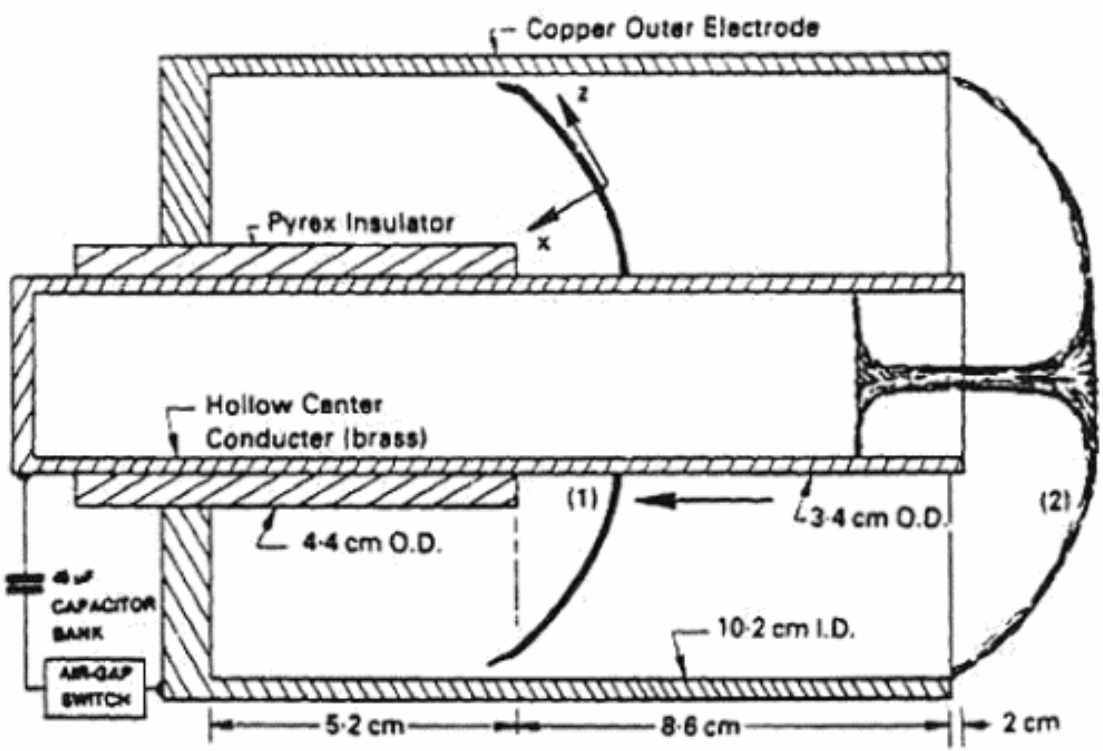


FIGURE 1. Cross section of typical plasma-focus device. Plasma sheath is shown while moving down electrodes and at time when plasmoids are produced.

DPF-Prinzip

1. Instabilität: Filamentpaare bilden sich

2. Instabilität: Filamente treffen radial zusammen, zentraler z-Pinch bildet sich

3. Kink-Instabilität: z-Pinch verdrillt sich, Plasmoid bildet sich

4. vermutlich Ionen-akustische Instabiltät: Plasmoid bricht zusammen

DPF-Prinzip

Hot Spot / Plasmoid bildet sich:

L. Faddeev, Antti J. Niemi 2000:

Stabiles self-confinement möglich

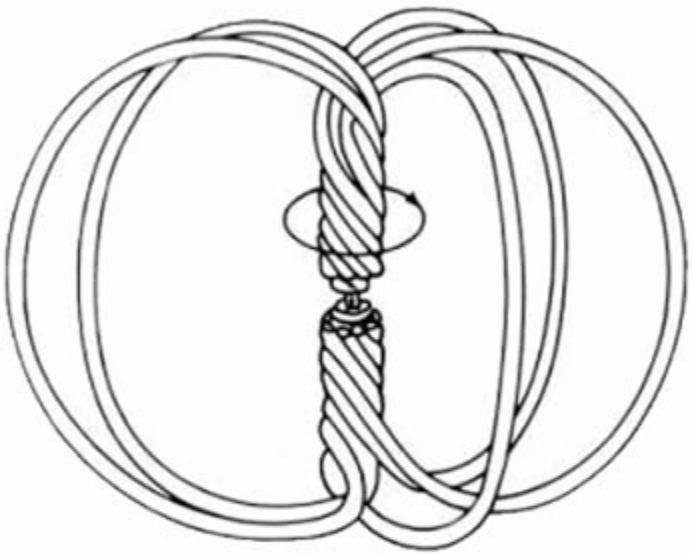
Röntgenbilder per Lochkamera zeigen:

Radius: $\leqslant 10\mu m$

Dichte (z.B. über Neutronen-TOF-Messung):

$$10^{20} - 10^{21} \frac{1}{cm^3}$$

Lebensdauer: $1 - 10 ns$



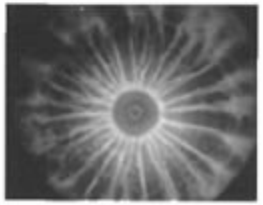


Fig. 6.13b. At the focus, the filaments annihilate each other, leaving only one, which necks off into a plasmoid, shown schematically. As it decays, the plasmoid emits two beams, each made up of tiny filaments organized into a helical pattern.

DPF-Prinzip

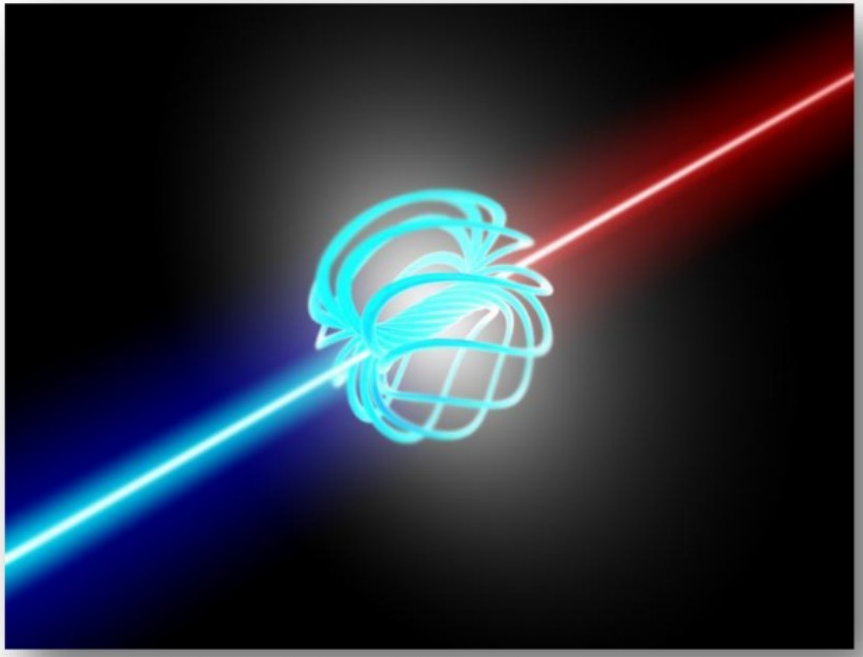
Magnetfeld bricht zusammen → starkes elektrisches Feld induziert

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t}$$

→ entgegengesetzte Strahlen aus Elektronen und Ionen

Elektronenstrahl heizt Plasmoid-Elektronen auf,

Elektronen im Plasmoid heizen Ionen auf



Artist's depiction of later-stage beams in an optimized plasmoid.

Effizienz und Drehimpuls

Kink-Instabilität abhängig von $\frac{B_\theta}{B_{total}}$

$$\frac{B_\theta}{B_{total}} = \sin\theta$$

mit Alfven Geschwindigkeit v am Anodenradius bei Peak-Strom

$$\theta = \theta_i e^{v\tau/r}$$

$$\frac{v\tau}{R} \propto \frac{L}{R}$$

Plasmoid-Radius wird durch Kink-Instabilität bestimmt

Suche nach optimales Verhältnis L/R

oder:

gezieltes Hervorrufen der Kink-Instabiltät durch Anfangsdrehimpuls

→ Kleines axiales Magnetfeld ausnutzen

Quanten-Magnetfeld-Effekt

Elektron im Magnetfeld: $$\hat{H}=\frac{1}{2}\left(\hat{p}_x{}^2+\left(\hat{p}_y-eBx\right)^2+\hat{p}_z{}^2\right)$$

Betrachte Bewegung senkrecht zu Magnetfeld:

Energie des n-ten Landau-Niveaus:

$$E_b=\left(n+\frac{1}{2}\right)\frac{e\hbar B}{mc}=\left(n+\frac{1}{2}\right)\cdot 11.6eV\cdot B(GG)$$

max. Impulsübertrag ist mv, also für $\frac{mv^2}{2}<E_b$ fast kein Übergang ins nächste Landau-Niveau

→ kaum Energie von Ionen zu Elektronen übertragen, wenn $E_i<\left(\frac{M}{m}\right)E_b$

→ Röntgenemission zusätzlich durch Entartung unterdrückt

Quanten-Magnetfeld-Effekt

Für $E_i = 300\,keV$ folgt: $B > 14\,GG$ für p

$B > 3.5\,GG$ für α

$B > 1.3\,GG$ für ^{11}B

Rechen-Beispiel:
(Lerner 2004)

Peak Current (MA)	B (GG)	$n\tau$ (10^{15}sec/cm^3)	T_e (keV)	Fusion/ brem
1.5	24	6.0	24	2.1
1.4	22.4	5.2	28	1.9
1.3	20.8	4.5	34	1.8
1.2	19.2	3.8	47	1.5
1.1	17.6	3.2	75	1.2
wenn Magnetfeld-Effekt vernachlässigt wird:			113	0.97

→ Fusionsheizung übersteigt Abkühlung durch Bremsstrahlung!

Quanten-Magnetfeld-Effekt

Bisherige Magnetfelder nur $\sim 0.4\,\mathrm{GG}$

→ Effekt noch nicht in DPF-Versuchen beobachtet

aber:

- wichtig bei Neutronensternen (McNally 1975)
- nachgewiesen beim Z-Pinch

- bis zu $2.4\,\mathrm{GG}$ bei DPF für kleinere Elektroden und höherer Strom erwartet

- weitere Steigerung auf $15\,\mathrm{GG}$ für ^{11}B

Bisherige Versuche

Versuche

Fillipov 1964 (kurze Anode)

Kurz darauf **Mather** (lange Anode)

Versuche auf der ganzen Welt in unterschiedlicher Skalierung

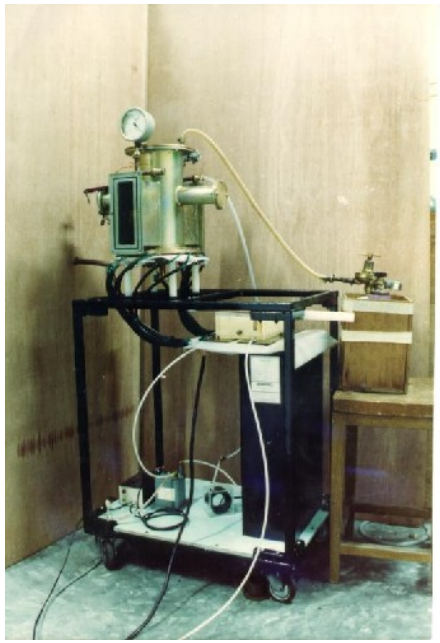
Anwendung:

DPF als intensive Röntgen-, Neutronen-, Ionenquelle

→ SXR-Lithografie, Produktion von Radionukliden, Raumfahrtantrieb, ...

Versuche

DPF realisiert für in Energie-bereich über 3 Größen-ordnungen!

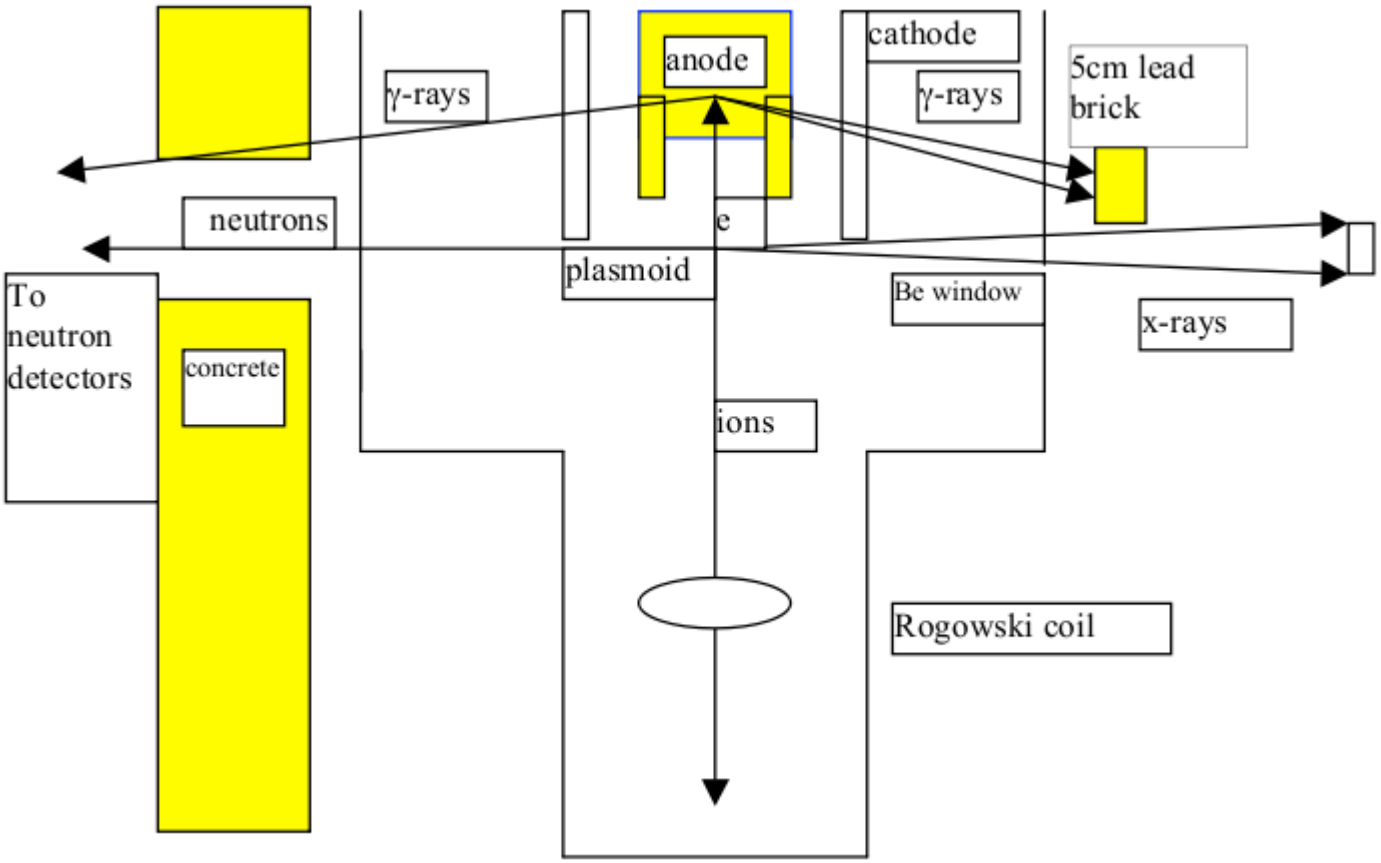


3 kJ DPF

	E_0	a	z_0	V_0	P_0	I_{peak}	v_a	ID	SF	Y_n
	kJ	cm	cm	kV	Torr	kA	cm/μs	kA/cm	(kA/cm) $torr^{0.5}$	10^8
PF1000	486	11.6	60	27	4	1850	11	160	85	1100
UNU ICTP	2.7	1.0	15.5	14	3	164	9	173	100	0.20
PF-400J	0.4	0.6	1.7	28	7	126	9	210	82	0.01

Versuche

Messungen von Lerner et al. :



→ Unterscheidung beider möglicher Prozesse der Röntgenemission

Versuche

Bestimmung der Plasmadichte

$$\begin{array}{lllllllll} D & + & D & \longrightarrow & {}^3He & + & n & + & 3.27\ MeV \quad (50\ \%) \\ & & & \text{or} & T & + & p & + & 4.03\ MeV \quad (50\ \%) \\ D & + & T & \longrightarrow & {}^4He & + & n & + & 17.59\ MeV \end{array}$$

$F = \langle \sigma v \rangle n_i \tau$

F: Anteil der Tritium-Teilchen, die fusionieren, wird bestimmt aus Verhältnis der gemessenen Neutronen beider möglichen Reaktionen

→ Bisher erreichte Dichte: $10^{20} - 10^{21} \frac{1}{cm^3}$

Mögliche Anwendung:

Aneutronische Fusion?

Aneutronische Fusion

Mögliche Fusionsreaktionen:

$$
\begin{array}{ccccccccccc}
\mathrm{D} & + & \mathrm{D} & \longrightarrow & {}^{3}\mathrm{He} & + & \mathrm{n} & + & 3.27\ \mathrm{MeV} & (50\ \%) \\
 & & & \text{or} & \mathrm{T} & + & \mathrm{p} & + & 4.03\ \mathrm{MeV} & (50\ \%) \\
\mathrm{D} & + & {}^{3}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{4}\mathrm{He} & + & \mathrm{p} & + & 18.35\ \mathrm{MeV} & \\
\mathrm{D} & + & \mathrm{T} & \longrightarrow & {}^{4}\mathrm{He} & + & \mathrm{n} & + & 17.59\ \mathrm{MeV} & \\
\mathrm{p} & + & {}^{11}\mathrm{B} & \longrightarrow & 3\ {}^{4}\mathrm{He} & & & + & 8.7\ \mathrm{MeV} &
\end{array}
$$

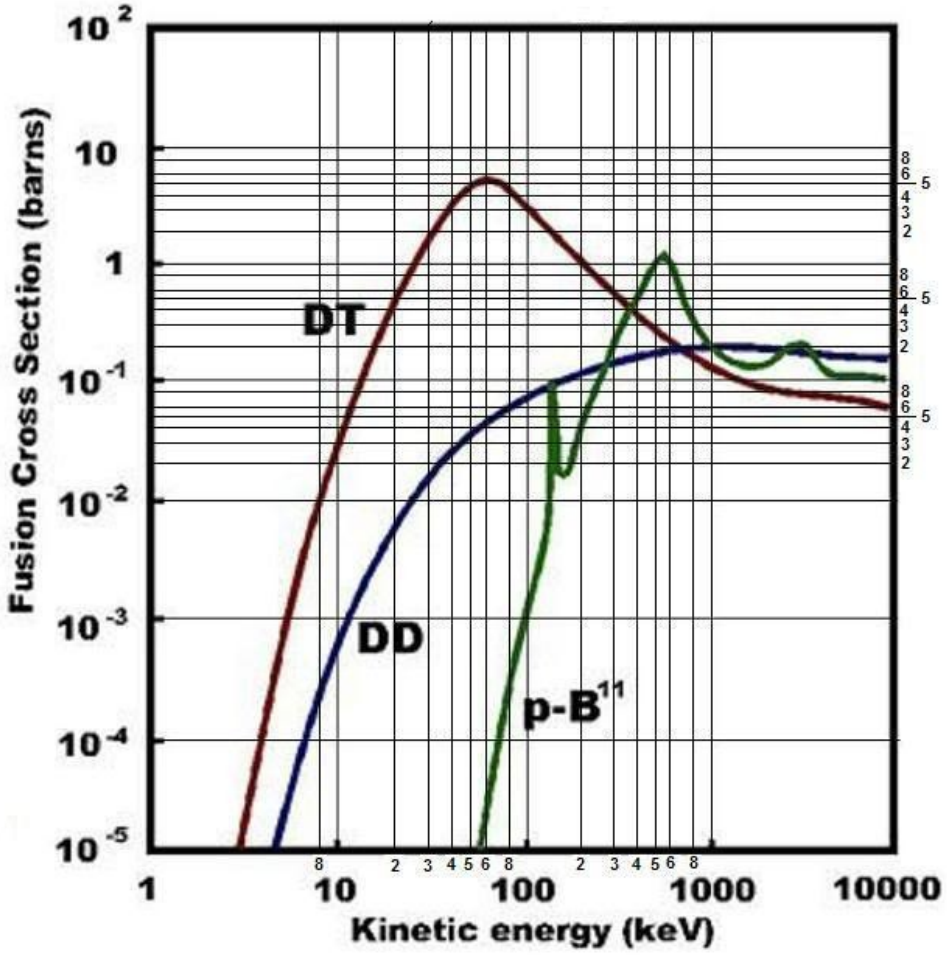
- keine Neutronen
- Energie wird in nur Form geladener Teilchen frei

Aneutronische Fusion

Wirkungsquerschnitt

Verschiedener

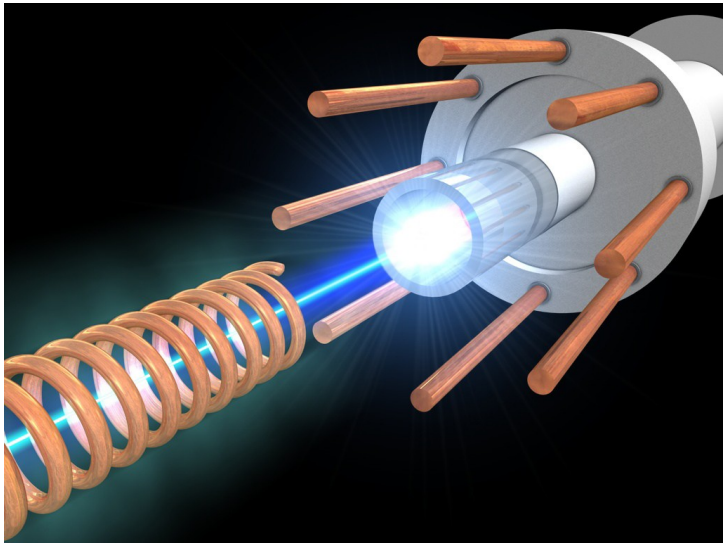
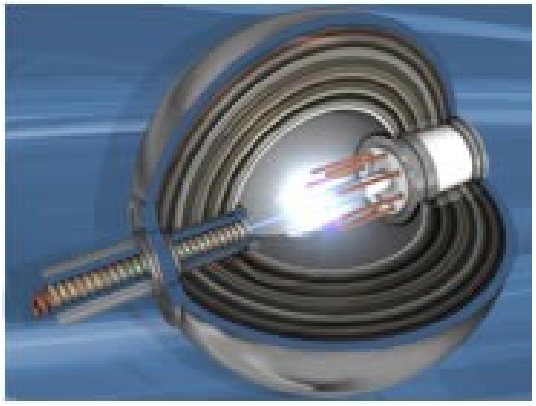
Reaktionen:



Aneutronische Fusion

Energiegewinung:

aus Ionenstrahl (Induktionsspule)

und Röntgenemission (photovoltaisch)

→ keine teuren Turbinen und Generatoren notwendig